# افزایش سختی سطح فولاد AISI1045 در فرآیند سنگ‌زنی HEDG با رویکرد بهینه‌سازی به دو روش تاگوچی و الگوریتم SA*

حمیدرضا فضلی شهری[۱] علی‌اکبر اکبری[۲]

**چکیده** *از مشکلات سنگ‌زنی حرارت اعمال شده به قطعات و باقی‌ماندن تنش پسماند روی سطح آنها است. از این رو، هدف این تحقیق بهینه‌سازی فرآیند است تا با در نظرگرفتن ترکیب بهینه‌ای از پارامترهای فرآیند، حرارت و تنش‌های پسماند کاهش یابد و از طرف دیگر بر استحکام و سختی سطح فولاد بیفزاید. با استفاده از روش تاگوچی، آزمایش‌های لازم برای گرفتن نتیجه‌ی قابل‌اطمینان طراحی شد و شرایط بهینه‌ی فرآیند به دست‌آمد. علاوه بر بهینه‌سازی فوق، پارامترهای فرآیند توسط روش SA بهینه‌سازی گردید. نتایج نشان می‌دهد که اختلاف پارامترهای به‌دست‌آمده از هر دو روش بسیار کم است و با اعمال پارامترهای حاصل از بهینه‌سازی، دمای وارد به سطح قطعه‌کار کاهش می‌یابد و سختی سطح بالا می‌رود. صحت این موضوع، با اندازه‌گیری و تحلیل ریزسختی مورد بررسی قرار گرفته است.*

**واژه‌های کلیدی** سنگ زنی، طراحی آزمایش‌ها، بهینه سازیSA و تاگوچی، ریزسختی سطحی، ریزساختار.

# Superficial Hardening of AISI1045 Steel in High Efficiency Deep Grinding Through Optimization Approaches, Taguchi Method and SA Algorithm

H.R. Fazli A.A. Akbari

**Abstract** *The major problem in material removal process specially grinding is heat generation during the process and thus residual stress on the surface of product. Therefore, optimization of High Efficiency Deep Grinding (HEDG) process is the main goal of this study in order to reduce heat and residual stress and also increase strength and surface hardness of AISI1045 steel by optimization of the process. In other words, the effects of main parameters e.g. depth of cut, wheel speed, workpiece speed and cross feed on surface hardness have been investigated in this study. Operating parameter optimizing through SA method in MATLAB's toolbox is so that the produced tensile residual stress and temperature decrease and meanwhile surface microhardness improves. Beside this, the results are validated by measuring and analyzing surface microhardness, surface temperature and forces. The obtained results reveal a good agreement between the optimization results and experimental observations.*

**Key Words** HED Grinding, DOE, SA & Taguchi Optimization, Microhardness, Microstructure

---

*تاریخ دریافت مقاله ۹۰/۳/۲۳ و تاریخ پذیرش آن ۹۱/۱۰/۱۰ می باشد.

(۱) کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۲) نویسنده‌ی مسؤول: استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

## مقدمه

از چالش‌های فراروی روش سنگ‌زنی باقی ماندن تنش‌های پسماند و ترک‌های ناشی از حرارت بر روی سطح محصولات است. این تنش‌ها که ناشی از حرارت است، اغلب از نوع کششی است و منجر به از دست رفتن سختی اولیه‌ی نمونه مخصوصاً در سطح آن می‌گردد [1]. مطالعات زوریتا و همکاران [2] نشان می‌دهد که فرآیند سنگ‌زنی سبب ایجاد تغییرات در خواص فیزیکی و مکانیکی قطعه می‌گردد. معمولی‌ترین تغییرات، ریز یا درشت‌شدن دانه‌های ساختار، ایجاد تنش پسماند و تغییرشکل پلاستیکی است که هر یک خواص قطعه‌کار را تغییر می‌دهند. منبع تنش‌های پسماند، تغییرشکل‌های پلاستیکی است که در اثر بارهای مکانیکی و حرارتی حین سنگ‌زنی نتیجه می‌شوند. درواقع تغییرشکل پلاستیکی نزدیک سطح مربوط به پارامترهای فرآیند است [3]. اثر این حرارت در فرآیند سنگ‌زنی عمیق با راندمان بالا بارزتر از سایر روش‌ها است، به‌گونه‌ای که اگر فرآیند کنترل نگردد و ترکیب نامناسبی از پارامترها انتخاب شود تنش حرارتی شدیدی به محصولات وارد می‌شود و در نتیجه سختی سطح موردنظر کاهش خواهد یافت. از این‌رو، این پژوهش تأثیر پارامترهای سنگ‌زنی روی عاملی چون سخت‌کاری سطحی فولاد AISI1045 را در یک فرآیند سنگ‌زنی بررسی می‌کند. این پارامترها سرعت قطعه‌کار، عمق برش، سرعت سنگ و بار عرضی هستند. از طرفی معادلات مربوط به سختی سطح، بار حرارتی، بار مکانیکی و زبری برای این روش (HEDG) از مطالعات قبلی استخراج شده است تا با انتخاب درست مقادیر پارامترها نه تنها مشکلات حرارتی کاهش یابد بلکه ترکیب بهینه‌ای از پارامترها که منجر به سخت‌کاری سطحی گردد به دست آید. ازاین‌رو، روش HEDG به‌عنوان روشی برای عملیات سخت‌کاری سطحی نیز معرفی می‌شود. مطالعات [2] نیز مؤید چنین مطلبی است؛ البته با این تفاوت که پارامتر سرعت سنگ در آن مورد بررسی قرار نگرفته است. برای این کار از روش طراحی آزمایش‌ها تاگوچی بهره گرفته شده است تا تأثیر هر پارامتر روی سخت‌کاری مطالعه شود و پارامترهای بهینه نیز به دست آید. علاوه‌براین، پارامترهای بهینه از روش بهینه‌سازی الگوریتم تبرید تدریجی (Simulated Annealing(SA)) استخراج می‌شود و با پارامترهای قبلی به دست‌آمده از روش تاگوچی مقایسه می‌گردد. در این بین سایر مقادیر به دست‌آمده از جمله زبری، دمای سطحی و نیروی لازم برای برداشت ماده نیز باید مورد توجه قرار گیرد تا از حد معمول تجاوز نکند. لذا برای این کار بهینه‌سازی به صورت مقید و با یک تابع چندهدفه انجام گرفته است. در ادامه تغییرات سختی و ریزساختاری برای شرایط بهینه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی المان محدود کارهای گذشته نیز بررسی شده است چرا که بر اساس یافته‌های سینز و کارلسون [4] با مطالعه بر تغییرات سختی و ریزساختار می‌توان به چگونگی توزیع تنش‌های پسماند در قطعات پی برد. نتایج موجود نشان می‌دهد که تنش‌های پسماند نزدیک به سطح بر خلاف آن‌چه در فرآیند سنگ‌زنی معمولی رخ می‌دهد، در روش HEDG به دلیل ماهیت فرآیند، اغلب اوقات از نوع فشاری است [7-5] و این خود دلیلی بر بالارفتن سختی سطح در قطعات است. از آن‌جایی که روش «سنگ‌زنی کم‌تنش» بر روی قطعاتی کاربرد دارد که در معرض تنش‌های بالا قرار دارند، با این روش نه تنها تنش‌های کششی در سطح کار باقی نمی‌ماند بلکه تنش‌های فشاری در سطح ایجاد می‌کند که زمینه را برای کار در محیط‌های دینامیکی نیز فراهم می‌سازد [8].

## طراحی آزمایش‌ها (DOE)

در این پژوهش به کمک روش طراحی آزمایش‌ها، تأثیر پارامترهای برش، از جمله عمق برش(A)، بار عرضی

(B)، سرعت سنگ (C)، و سرعت قطعه‌کار (D) روی سخت‌کاری سطحی فولاد AISI1045 در فرآیند سنگ‌زنی مورد بررسی قرار گرفته است تا از طریق آن دست‌یابی به شرایط بهینه به منظور بهبود خواص مکانیکی محصول امکان‌پذیر گردد. یکی از روش‌های طراحی آزمایش‌ها روش فاکتوریلی است. طراحی به این روش سبب حجم زیاد آزمایش‌ها ($N = L^m =$ سطح$^{\text{عامل}}$ $= 4^4 = 256$) و در نتیجه عدم صرفه‌ی اقتصادی برنامه و عدم بهینه‌سازی می‌شود. ازاین‌رو، در این مطالعه از روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی استفاده شده‌است. هم‌چنین از طریق تحلیل تاگوچی می‌توان مقادیر سختی سطحی حاصل برای آن دسته از آزمایش‌های انجام‌نشده را نیز بدون انجام آزمایش پیش‌بینی نمود. برای این منظور لازم است ابتدا عوامل مؤثر بر سختی نهایی را تعیین نمود. سپس برای هر کدام از این عوامل، با توجه به میزان تأثیر و اهمیت آن، تعدادی مقادیر آزمایشی در نظر گرفت. با مشخص‌شدن تعداد فاکتورها و مقادیر آن‌ها می‌توان آزمایش‌ها لازم را به روش تاگوچی طراحی کرد. پس از انجام این آزمایش‌ها و با تحلیل نتایج به دست‌آمده، شرایط بهینه‌ی فرآیند سنگ‌زنی تعیین می‌گردد. از آن‌جایی‌که با توجه به مطالعات پیشین، تأثیر پارامتر عمق براده‌برداری بر سختی سطحی بیش‌تر از سایر پارامترها است [2]، لذا در این بررسی از روش طراحی سطوح مخلوط بهره گرفته شد. به عبارت دیگر، به منظور دست‌یابی به حداقل تعداد آزمایش‌های لازم و در عین حال کافی برای طراحی آزمایش‌های سنگ‌زنی به روش تاگوچی، برای سه عامل نرخ تغذیه قطعه‌کار، سرعت ابزار و سرعت قطعه‌کار ۳ سطح، و برای عامل عمق براده‌برداری به دلیل اهمیت و تأثیر بیش‌تر ٦ سطح در نظرگرفته شد. انتخاب شش سطح برای عامل A، و سه سطح برای سایر عوامل اختیاری بوده و به اقتضای زمان در اختیار و امکانات آزمایشگاهی صورت گرفته است. مقادیر هر یک از این سطوح نیز با توجه به قیدهای فرآیند و قیدهای متغیر به صورت دل‌خواه اختیار شده است. علاوه بر این، در این پژوهش سعی شده است تا مقادیر متغیرها در سه سطح سنگ‌زنی نرم، متوسط و خشن جای گیرند. این عوامل و مقادیر هر یک در جدول (۱) ذکر شده است. شرایط ذکرشده مطابق جدول (۲) در آرایه‌ی L18 طراحی تاگوچی با سطوح مختلط گنجانده شده است. بنا بر این جدول، ۱۸ آزمایش لازم برای بهینه‌سازی مشخص می‌گردد.

جدول۱ عوامل مؤثر بر سختی سطحی و مقادیر انتخابی آزمایش

| فاکتور سطح / عامل | (A) | (B) | (C) | (D) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.005 | 2 | 20 | 2 |
| 2 | 0.050 | 6 | 30 | 13 |
| 3 | 0.250 | 11 | 35 | 20 |
| 4 | 0.500 | - | - | - |
| 5 | 0.750 | - | - | - |
| 6 | 1.000 | - | - | - |

جدول۲ آرایه‌ی L18 طراحی تاگوچی با ٤ عامل و سطوح مختلط

| فاکتورسطح / ردیف | A | B | C | D |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| 3 | 1 | 3 | 3 | 3 |
| 4 | 2 | 1 | 1 | 2 |
| 5 | 2 | 2 | 2 | 3 |
| 6 | 2 | 3 | 3 | 1 |
| 7 | 3 | 1 | 2 | 1 |
| 8 | 3 | 2 | 3 | 2 |
| 9 | 3 | 3 | 1 | 3 |
| 10 | 4 | 1 | 3 | 3 |
| 11 | 4 | 2 | 1 | 1 |
| 12 | 4 | 3 | 2 | 2 |
| 13 | 5 | 1 | 2 | 3 |
| 14 | 5 | 2 | 3 | 1 |
| 15 | 5 | 3 | 1 | 2 |
| 16 | 6 | 1 | 1 | 2 |
| 17 | 6 | 2 | 1 | 3 |
| 18 | 6 | 3 | 2 | 1 |

## بهینه‌سازی فرآیند HEDG با الگوریتم SA

***بهینه‌سازی.*** از آن‌جایی که فرآیند HEDG به لحاظ اقتصادی پرهزینه است، لذا به‌جاست تا این فرآیند با روش‌های عددی بهینه‌سازی گردد تا پارامترهای بهینه برای موفقیت‌آمیزبودن هدف مورد نظر به‌دست آید و از صرف هزینه‌های گزاف برای انجام آزمایش‌ها جلوگیری گردد. همان‌طور که ذکر شد، بهبود خواص مکانیکی یکی از اهداف این پژوهش است، لذا بهینه‌سازی می‌بایست به‌گونه‌ای انجام شود که پارامترهایی را به‌عنوان خروجی ارائه دهد تا منجر به ایجاد تنش فشاری و سختی روی سطح قطعات شود. از طرف دیگر یکی از چالش‌هایی که فراروی روش‌های بهینه‌سازی قرار دارد این است که بهینه‌سازی یک جنبه از فرآیند، ممکن است تأثیر نامطلوبی بر سایر جنبه‌های فرآیند داشته باشد [9]. از این‌رو، راه حلی که در این‌جا پیشنهاد می‌گردد این است که تابع هدف مورد استفاده در بهینه‌سازی از نوع توابع چندهدفه باشد تا با در نظر گرفتن جنبه‌های مختلف از فرآیند هم‌چون دما، سختی سطح، نیرو و زبری شرایط بهینه را ارضا نماید. روند بهینه‌سازی بدین صورت است که به کمک الگوریتم بهینه‌ساز SA موجود در جعبه ابزار نرم‌افزار MATLAB و تعریف پارامترهای لازم برای آن که در ذیل بیان می‌شود، فرآیند بهینه‌سازی می‌گردد. پارامترهای انتخاب‌شده بر پایه‌ی تجربه معمولاً جنبه‌ی محافظه‌کارانه دارند و نمی‌توانند هرگونه معیار اقتصادی را برآورده نمایند.

## مدل‌سازی ریاضی فرآیند سنگ‌زنی (تابع هدف)

***سختی.*** بر اساس نتایج گذشته، تنظیمات ریاضی متعددی برای ایجاد یک عبارت ریاضی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، عبارت ریاضی که نماینده‌ی قابل‌اطمینانی برای تغییرات سختی (HB) به‌عنوان تابعی از پارامترهای مختلف برشی باشد. این عبارت که اطلاعات آزمایشگاهی را به به‌ترین نحو بیان می‌کند برای فولاد AISI 1045 به دست آمده، که به صورت زیر است [2]:

$$HB = a_g^{0.0354} . e^{(4.38+83.7a_g+2.62s-1.07v_w-187s+76.3a_g.v_w)} \quad (۱)$$

این عبارت از بین سایر عبارات انتخاب می‌شود چرا که انحراف معیار کمی دارد و نشان می‌دهد که با مقادیر آزمایشگاهی مطابقت خوبی دارد. در این رابطه $a_g$ عمق براده‌برداری (mm)، s نرخ تغذیه قطعه‌کار (mm/pass)، $v_w$ سرعت قطعه‌کار (m/min) است. توجه شود تمام مقادیری که بر حسب برینل از این معادله به‌دست می‌آید برای مقایسه‌ی ساده‌تر به مرجع سختی ویکرز تبدیل می‌شود.

***بارگذاری گرمایی سطح قطعه‌کار.*** طبق نظریه‌ی Werner در عمق برش زیاد و سرعت‌های نسبتاً پایین قطعه‌کار، می‌توان حداکثر درجه حرارت ($T_{max}$) را در نقطه‌ای نزدیک به سطح تازه‌ایجادشده‌ی قطعه‌کار از رابطه‌ی زیر محاسبه نمود [10]:

$$T_{max} = \frac{K_T}{0.9} . (C_1)^{0.1} . (v_c)^{0.2} . (a_g . v_w)^{0.2} . (a_g)^{-0.7} . (d_s)^{0.1} \quad (۲)$$

که در رابطه‌ی فوق $d_s$ قطر چرخ سنگ (mm)، $K_T$ و $C_1 = 80$ ثابت‌های معادله‌اند.

***بار مکانیکی سطح قطعه‌کار.*** طبق نظریه‌ی Werner رابطه‌ی نیروی کل سنگ‌زنی ($\acute{F}$ بر حسب نیوتن) را که بر حسب واحد عرض سنگ بیان می‌شود، می‌توان به صورت زیر ارائه داد [10]:

$$\acute{F} = \frac{K_n}{0.9} . (C_1)^{0.1} . \left(\frac{a_g . v_w}{v_c}\right)^{0.8} . (a_g . d_s)^{0.1}$$

که در روابط فوق $K_n$ و $K_T$ جزء ثابت معادله محسوب می‌شوند و در شرایط آزمایش به صورت $25 \leq K_n \leq 20$ و $50 \leq K_T \leq 45$ در نظر گرفته شده‌اند.

***زبری سطح.*** رابطه‌ی زیر برای زبری بر حسب پارامترهای برشی است. $R_t$ حداکثر اختلاف بین نوک یک ارتفاع و عمق یک دره در طول مشخصی از قطعه‌کار است. در این رابطه، $v_c$ سرعت چرخ سنگ، $d_e$ قطر معادل چرخ سنگ، r فاکتور شکل دانه‌ی ساینده و C دانسیته‌ی دانه‌های برنده فعال است [11]. قابل ذکر است به دلیل آن‌که پارامترها در الگوریتم SA به صورت مقایسه‌ای مورد بحث و ارزیابی قرار می‌گیرند، لذا در اختیار داشتن مقدار عددی ثابت در روابط ضروری نیست:

$$R_t = \left(\frac{v_w}{v_c}.\frac{1}{C.r.\sqrt{d_e}}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (۲)$$

***تابع هدف کلی.*** بر اساس روابط بالا تابع هدف کلی که همه‌ی حالات مختلف را ارضا کند، به‌صورت تابع مجموع مربع‌های خطا در نظر گرفته می‌شود که هدف کمینه‌کردن این تابع است:

$$EF = W_1.\frac{(HB^d - HB)^2}{HB^2} + W_2.\frac{({T_{max}}^d - T_{max})^2}{{T_{max}}^2} + W_3.\frac{(\acute{F}^d - \acute{F})^2}{\acute{F}^2} + W_4.\frac{({R_t}^d - R_t)^2}{{R_t}^2} \quad (۳)$$

که در آن $W_i$ها ضرایب وزنی است که در این‌جا سهم $W_1$ بیش از دیگر ضرایب در نظر گرفته شده است. اندیس d بیانگر مقدار مطلوب برای هر پارامتر است [12] و به صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند:

$$\begin{cases} \frac{1}{2}W_1 = W_2 = W_3 = W_4 = 0.2 \\ (HB^d = 350) \text{ یا } (HV = 368) \\ {T_{max}}^d = 450 \\ \acute{F}^d = 80 \\ {R_t}^d = 0.8 \end{cases} \quad (٤)$$

از آن‌جا که در این پژوهش به پارامتر سختی اهمیت بیش‌تری داده شده است، لذا ضریب وزنی آن ($W_1$) بیش‌تر از سایر پارامترها در نظر گرفته شده است (سهم این پارامتر به طور دل‌خواه و برابر ۰/٤ از کل سهم‌ها انتخاب شده است). دیگر پارامترها که همگی در درجه‌ی دوم اهمیت قرار دارند، با ثابتی برابر در نظر گرفته شده‌اند (سهم هر یک از این پارامترها نیز به طور دل‌خواه انتخاب شده و برابر۰/۲ است). مجموع این مقادیر (ضرایب وزنی $W_i$ها) می‌بایست برابر یک باشد. از طرفی ملاحظه می‌شود که برای هر یک از پارامترهای سختی، دما، نیرو و زبری، مقادیری تحت عنوان مقادیر مطلوب اختصاص داده شده است. این مقادیر در واقع مقدار ایده‌آل برای هر پارامتر است که رویکرد بهینه‌سازی مقاله نیز رسیدن به آن‌ها است و با توجه به شرایط فرآیند، مشخصات و جنس قطعه و مقادیر به‌دست‌آمده از آزمایش‌های کمکی (که قبل از آزمایش‌های اصلی انجام گرفته است) در نظر گرفته شده‌اند.

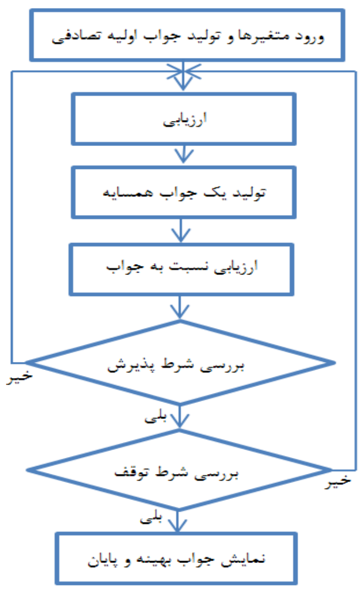
***قیدهای فرآیند.*** می‌توان به روشنی دریافت که یک حل کامل‌تر برای مسأله‌ی سنگ‌زنی در صورتی امکان‌پذیر است که چندین قید واقعی از فرآیند واقعی در نظر گرفته شود. قیود مسأله می‌تواند به دو گروه قیدهای فرآیند (a) و قیدهای متغیر (b) تقسیم‌بندی گردد. قیود فرآیندی که در این کار در نظر گرفته شده‌اند عبارتند از قید آسیب حرارتی، بار مکانیکی و

زبری سطح (مقادیر بحرانی هر یک ذکر شده است). قیود متغیر همان حدود بالایی و پایینی شرایط فرآیند هستند [13]:

$$(a):\begin{cases} T_{max} \le T^{c}_{max}\,, & T^{c}_{max} = 550°C \\ F' \le F'^{c} \,, & F'^{c} = 250N \\ R_t \le R^{c}_t \,, & R^{c}_t = 4.5\mu m \end{cases} \qquad (۵)$$

$$(b):\begin{cases} 0.005 \le a_g \le 1 \\ 0.5 \le v_w \le 30 \\ 5 \le v_s \le 80 \\ 0.05 \le s \le 20 \end{cases}$$

گستره‌ی قیدهای متغیر ($a_g$، $v_w$، $v_s$ و $s$) به اقتضای محدودیت‌های آزمایش و شرایط حاکم بر آن تعیین شده است. هم‌چنین مقادیر بحرانی $T^c_{max}$، $F'^c$ و $R^c_t$ با توجه به جنس قطعه و مقادیر به‌دست‌آمده از آزمایش‌های کمکی (که قبل از آزمایش‌های اصلی انجام گرفته است) انتخاب شده است. به عبارت دیگر، آزمایش‌های کمکی روشن می‌سازد که عدول از مقادیر بحرانی فوق می‌توانند سبب ایجاد عوامل نامطلوبی هم‌چون سوختگی سطح نمونه، ارتعاشات دستگاه سنگ و زبری بیش از اندازه در سطح نمونه گردد.




شکل ۱ فلوچارت الگوریتم SA [14]

## روش بهینه‌سازی

***الگوریتم تبرید تدریجی (Simulated Annealing).*** روش SA بر پایه‌ی مفهوم مدل‌سازی و شبیه‌سازی یک سیستم ترمودینامیکی است. دو عملگر بنیادی هم‌چون تولید نسل و تابع زمانی سرمایش انتخاب می‌شوند که در ذیل به شرح هر یک از آن‌ها پرداخته می‌شود [14]. روند کلی این نوع الگوریتم در شکل (۱) آمده است.

***تولید همسایگی.*** یک نقطه‌ی آزمایشی جدید x′ نسبت به نقطه فعلی x بر اساس رابطه‌ی (۷) تولید می‌شود. θ میزان دما (θ(T)=T/a)، a یک پارامتر مقیاس و T مقدار فعلی پارامتر کنترل دما است که از تابع زمانی سرمایش حاصل می‌شود [14]:

$$x' = x + \theta(T) \qquad (٦)$$

***تابع سرمایش.*** تابع زمانی سرمایش به صورت زیر بیان می‌شود [14]:

$$T = T_0 \left(\frac{T_n}{T_0}\right)^{\frac{t}{a}} \qquad (۷)$$

که در آن t، a، $T_0$ و $T_n$ به ترتیب شمارنده‌ی تغییرات دما، فاکتور مقیاس، دمای اولیه و دمای نهایی (بر حسب درجه‌ی سانتی‌گراد) هستند. روش SA ممکن است فضای حالت نامطلوبی را برای تولید فضای حالت همسایه‌ی جدید قبول کند. بر اساس این P، اندازه‌ی احتمالی مورد پذیرش، از به دام افتادن در نقاط بهینه‌ی محلی جلوگیری می‌کند. رابطه‌ی احتمال پذیرش در اینجا به‌صورت زیر است:

$$P = e^{-\frac{\Delta E \beta}{T}} \qquad (۸)$$

که در آن β یک مقدار مثبت برای پارامتر مقیاس است و ΔE مقدار تغییرات بین دو جواب همسایه می‌باشد [14].

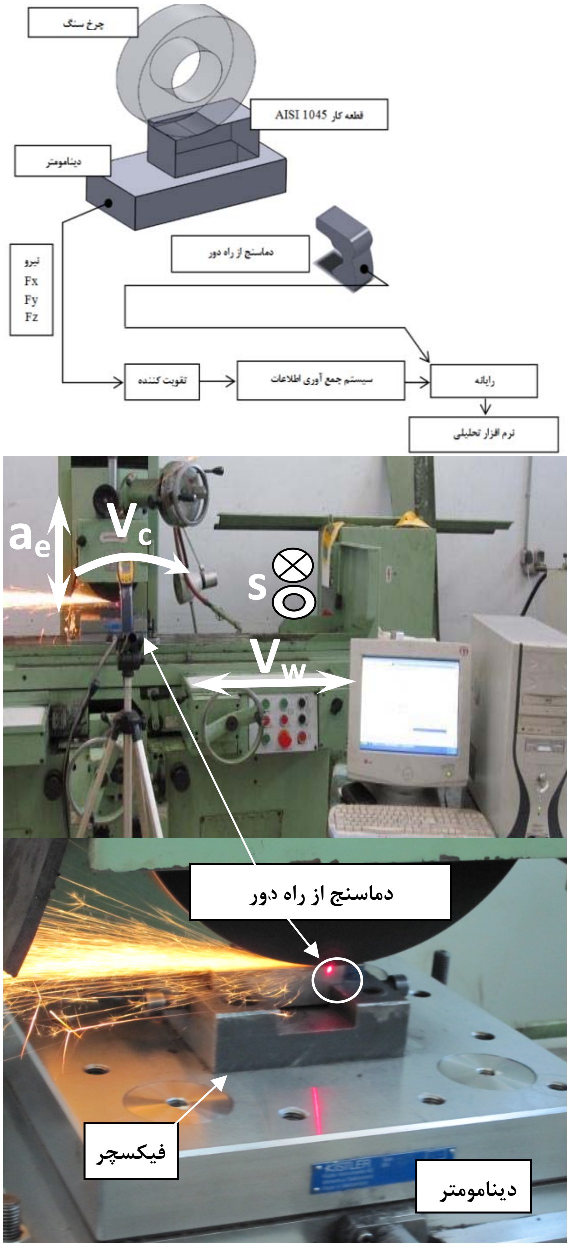
بـر اسـاس توابـع هـدفی کـه در بـالا ذکـر شـد بهینه‌سازی به‌روش SA انجـام گرفتـه و مقـادیر چهـار پـارامتر متنـاظر بـا حالـت بهینـه اسـتخراج مـی‌شـود. علاوه‌براین، مقادیر پارامترها برای حالـت پـنجم کـه از تابع هدف کلی نتیجه شده است، نیز به دست مـی‌آیـد. این مقادیر به گونه‌ای هستند کـه تمـام قیـدها و چهـار تابع هدف تکین ذکرشده را ارضا می‌نمایند. جدول (۳) مقادیر بهینه‌ی هر ٤ تابع تکین را بـه‌صـورت جداگانـه نشان می‌دهد. مقدار بهینـه‌ی کلـی کـه از رابطـه‌ی (۵) حاصل شد نیز در سطر پـایین ایـن جـدول ذکـر شـده است.

جدول ۳ مقادیر پارامترهای بهینه‌ی حاصل از هر تابع هدف و مقدار بهینه‌ی کلی که شرایط هر چهار تابع هدف را ارضا نماید

| نتیجه حاصل از بهینه‌سازی | $\begin{bmatrix} v_w(m/min) & v_c(m/s) \\ s(mm/Pass) & a_e(mm) \end{bmatrix}$ |
|---|---|
| تابع سختی (حالت۱) | $\begin{bmatrix} 25.12 & 31 \\ 5.112 & 0.092 \end{bmatrix}$ |
| تابع بار مکانیکی (حالت۲) | $\begin{bmatrix} 15.23 & 52 \\ 4.012 & 0.304 \end{bmatrix}$ |
| تابع زبری سطح (حالت۳) | $\begin{bmatrix} 6.012 & 45 \\ 6.318 & 0.012 \end{bmatrix}$ |
| تابع دمایی (حالت۴) | $\begin{bmatrix} 20.36 & 14 \\ 3.980 & 0.192 \end{bmatrix}$ |
| مقدار بهینه‌ی کلی (حالت۵) | $\begin{bmatrix} 26.51 & 28 \\ 10.12 & 0.944 \end{bmatrix}$ |

## آزمایش‌های عملیات حرارتی و سنگ‌زنی

فرآیندهای حرارتی و سنگ‌زنی روی قطعاتی از جـنس فولاد AISI1045 با مشخصات جدول‌های ٤ و ۵، و بـا پارامترهای عملکردی مشخص انجام می‌گیـرد. پـس از برش نمونه‌ها در ابعاد مـورد نظـر ($۱۰×۳۰×٤۰ \ mm^3$)، عملیات حرارتی آنیلینگ روی آن‌ها انجام می‌گیرد. این کار شامل نگه‌داری نمونه‌ها در کـوره بـرای ۱ سـاعت است تا به دمای ۸٦۰°C برسند و در ادامه تا سرد شدن کامل در کوره نگه داشته می‌شـوند. انـدازه‌گیـری‌هـای سختی سطحی بر اساس مرجع سـختی ویکـرز اسـت. این اندازه‌ها با نتایج سختی پـس از فرآینـد سـنگ‌زنـی مقایسه می‌گردد.




شکل ۲ نمایش شماتیکی از تنظیمات فرآیند و شرایط آزمایش

جدول ٤ ترکیب شیمیایی فولاد AISI1045(wt.%) [15]

| C | Si | Mn | Fe | P | S | Cr |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.4-0.5 | 0.2 | 0.6 | 98 | 0.04 | 0.05 | 0.20 |

جدول ٥ خواص فیزیکی-مکانیکی فولاد AISI1045 (wt.%) [15]

| هدایت حرارتی | انبساط حرارتی | استحکام کششی | تنش تسلیم |
|---|---|---|---|
| 50.9 W/(m×K) | 15.1×10-6 ºC⁻¹ | 585MPa | 505MPa |

برای فرآیند سنگ‌زنی مطابق شکل (٢)، یک ماشین با اسپیندل افقی، مدل TOS HOSTIVAR 320A استفاده شده است. تمام آزمایش‌ها با چرخ‌سنگ Aluminum Oxide با ضخامت ٢٠ mm و قطر داخلی ٢١ mm انجام می‌گیرد. همان‌طور که ذکر گردید، برای رسیدن به سختی سطح بالاتر این امکان وجود دارد که مقادیر پارامترها به‌گونه‌ای باشد که با اعمال آن‌ها، سایر عوامل هم‌چون دمای سطح، نیرو و زبری از محدوده‌ی مجاز تجاوز نماید. لذا ضروری است که ترکیب بهینه‌ای از پارامترها انتخاب شده و علاوه بر سختی سطح، مقادیر عوامل فوق نیز اندازه‌گیری و ثبت گردند. در حین انجام فرآیند مقادیر دما و نیرو به ترتیب با دماسنج مادون قرمز Infrared/Type K و دینامومتر (Kistler B9255, Amplifier Kistler) نیز ثبت می‌شود تا با نتایج حاصل از توابع بهینه‌سازی مقایسه گردند. دقت دماسنج ١°C و دقت دینامومتر ٠/١N است. ضمناً مقادیر زبری با استفاده از زبری‌سنج Profilometer-Pocket Surf III پس از انجام فرآیند اندازه‌گیری می‌شوند.

## نتایج و بحث

***تحلیل نتایج طراحی تاگوچی.*** داده‌های به‌دست آمده از اندازه‌گیری سختی سطحی حاصل از انجام ١٨ آزمایش بهینه‌سازی در جدول (٦) ارائه شده است. اندازه‌گیری سختی سطحی برای هر نمونه ٣ بار تکرار شده و مقدار میانگین محاسبه گردید. (محل اندازه‌گیری سختی سطح در شکل (٧) به تصویر کشیده شده است که درست در قسمت میانی نمونه و در جهت عمود بر جهت سنگ‌زنی است). داده‌های حاصل توسط روش تحلیل طراحی تاگوچی با استفاده از نرم‌افزار Minitab بررسی شد و نمودارهای اثر هر فاکتور بر سختی سطحی میانگین رسم گردید. این نمودارها در شکل (٣) نشان داده شده‌اند.

جدول ٦ نتایج سختی‌سنجی نمونه‌ها به روش ویکرز. اثر افزایش پارامترهای برشی بر سختی نمونه در شکل (٨) به تصویر کشیده شده است، که اطلاعات مربوط به آن در شش ردیف از این جدول با علامت ستاره مشخص شده‌اند.

| | ردیف / پارامترها | A= $a_g$ | B=s | C= $V_c$ | D= $V_w$ | $HV_{avg}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| * | 1 | 0.005 | 2 | 20 | 2 | 193.9 |
| | 2 | 0.005 | 6 | 30 | 13 | 201.0 |
| | 3 | 0.005 | 11 | 35 | 25 | 204.0 |
| * | 4 | 0.050 | 2 | 20 | 13 | 210.7 |
| | 5 | 0.050 | 6 | 30 | 25 | 215.0 |
| | 6 | 0.050 | 11 | 35 | 2 | 218.5 |
| | 7 | 0.250 | 2 | 30 | 2 | 225.8 |
| | 8 | 0.250 | 6 | 35 | 13 | 241.0 |
| * | 9 | 0.250 | 11 | 20 | 25 | 231.8 |
| | 10 | 0. 500 | 2 | 35 | 25 | 261.0 |
| | 11 | 0. 500 | 6 | 20 | 2 | 254.0 |
| * | 12 | 0. 500 | 11 | 30 | 13 | 263.5 |
| | 13 | 0.750 | 2 | 30 | 25 | 265.4 |
| * | 14 | 0.750 | 6 | 35 | 2 | 268.0 |
| | 15 | 0.750 | 11 | 20 | 13 | 260.1 |
| * | 16 | 1.000 | 2 | 35 | 13 | 269.6 |
| | 17 | 1.000 | 6 | 20 | 25 | 273.3 |
| | 18 | 1.000 | 11 | 30 | 2 | 279.7 |

تحلیل طراحی تاگوچی به این روش امکان بررسی اثر هر یک از عوامل مؤثر بر سختی نهایی را به‌طور مجزا و تنها با انجام تعداد محدودی آزمایش فراهم می‌کند. با توجه به این نمودارها مشخص می‌شود که اثر فاکتور عمق برش (A) بر سختی بیش از سایر عوامل است و هم‌چنین فاکتور سرعت سنگ (C) اثری افزایشی-کاهشی دارد. لذا لازم است در بررسی‌های آتی برای تعیین دقیق‌تر روند تغییرات سختی، این فاکتور با تعداد سطوح بیش‌تری ارزیابی گردد. تحلیل تاگوچی هم‌چنین با روش آنالیز واریانس درجه اهمیت

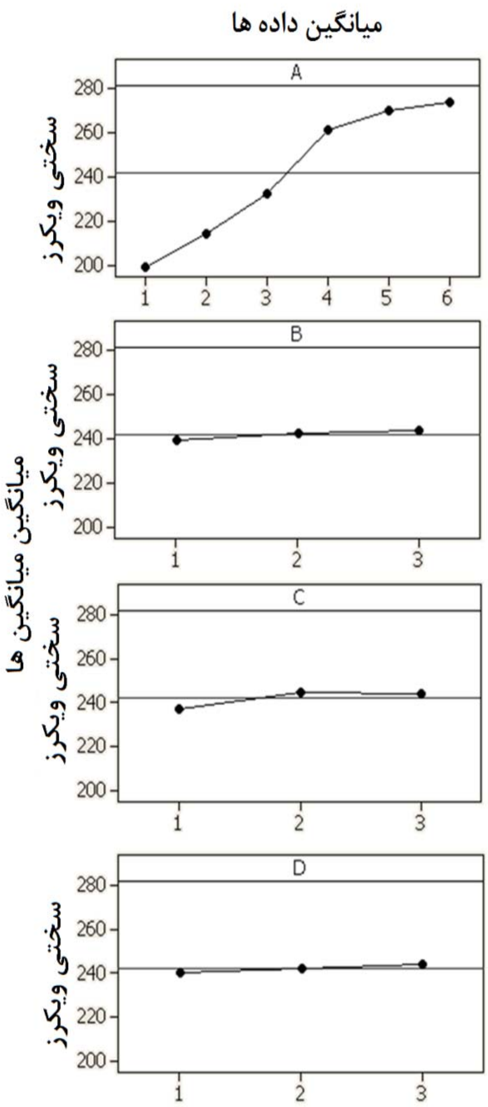
و تأثیر عوامل انتخابی را به‌ترتیب مشخص می‌کند که در جدول (۷) ذکر شده‌است. بر اساس آن نتیجه شد که تغییرات عوامل A، C، B و D به‌ترتیب بیش‌ترین تأثیر را بر سختی نهایی دارند.

نتایج سختی‌سنجی ۱۸ نمونه‌ی آزمایشی نشان می‌دهد که نمونه‌ی حاصل از آزمایش شماره ۱۸ با بیش‌ترین سختی نهایی، دارای شرایط بهینه است. اما با توجه به نمودارها مشخص می‌شود که با انتخاب سطح ٦ برای فاکتور عمق برش (A)، سطح ۳ برای فاکتور تغذیه (B)، سطح ۲ برای فاکتور سرعت سنگ (C) و سطح ۳ برای فاکتور سرعت قطعه‌کار (D) بیش‌ترین مقدار سختی نهایی حاصل می‌شود. تفاوت این شرایط با آزمایش شماره ۱۸ در سطح فاکتور D است. روش تاگوچی با وجود کاهش تعداد آزمایش‌های لازم برای بهینه‌سازی شرایط، امکان پیش‌بینی نتیجه‌ی حاصل برای دیگر آزمایش‌های حذف‌شده در مقایسه با روش فاکتوریلی را نیز فراهم می‌کند. از این‌رو، در ادامه سختی حاصل برای آزمایش شماره‌ی ۱۸ و البته با تغییر سطح فاکتور D در آن از ۱ به ۳ پیش‌بینی شد و مشاهده گردید که مقدار آن از مقدار سختی مربوط به آزمایش ۱۸ بیش‌تر بود (۲۸٦/۲). از این رو شرایط بهینه به صورت جدول (۷) است.

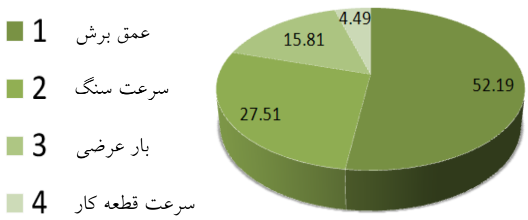
در شکل (٤) فاکتورهای ۱، ۲، ۳ و ٤ همان فاکتورهای عمق برش، سرعت سنگ، نرخ تغذیه و سرعت قطعه‌کار است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود سهم پارامتر عمق برش بیش از مجموع سایر پارامترهاست و در این بین سرعت قطعه‌کار با 4.49% دارای کم‌ترین میزان تأثیر روی سخت‌کاری است.

جدول ۷ تغییرات و ترتیب تأثیر هر پارامتر با روش آنالیز واریانس در تحلیل تاگوچی به همراه شرایط بهینه

| متغیر | A | B | C | D | HV |
|---|---|---|---|---|---|
| DELTA | 311 | 31 | 33 | 20 | - |
| RANK | 1 | 3 | 2 | 4 | - |
| پارامترهای بهینه | 1 | 11 | 30 | 25 | 286.2 |




شکل ۳ نمودارهای بررسی تغییر سختی میانگین نهایی با تغییرات فاکتورهای مؤثر بر آن به‌طور مجزا

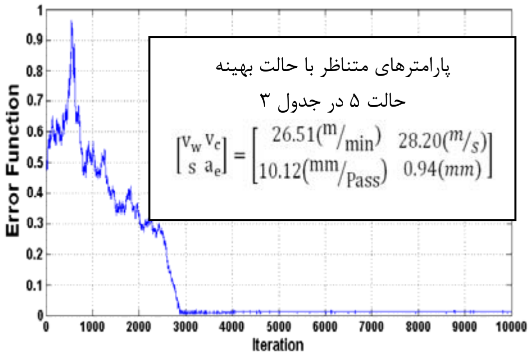



شکل ٤ میزان تأثیر هر پارامتر روی سخت‌کاری سطح

***تحلیل نتایج به‌دست آمده از الگـوریتم SA.*** شـکل (۵) پارامترهای بهینه‌ی حاصـل از تـابع هـدف کلـی را نشان می‌دهد. ایـن درحـالی اسـت کـه نبایـد قیـود از محدوده‌ی مجاز تجاوز نمایند. مقادیر دما و نیرو که در حین فرآیند به‌ترتیب با استفاده از دماسنج مادون قرمـز (Infrared Thermometer) و دینامومتر ثبـت شـده‌انـد به‌همراه مقدار زبری انـدازه‌گیـری‌شـده در جـدول (۸) نشان داده شده است. همه‌ی مقادیرسختی سطح، زبری سطح، دما و نیروی وارد بر قطعه‌کار کـه پـس از اتمـام آزمایش در اختیار قرار گرفتـه‌انـد بـا نتـایج حاصـل از توابع هدف بهینه‌سازی مقایسه شده‌اند. مقـادیر حاصـل از بهینه‌سـازی بـا اعمـال پارامترهـای بهینـه بـه‌دسـت آمده‌اند. مقدار سختی سطح حاصـل از روش تـاگوچی نیز در این جدول با مقادیر متناظر تجربی و بهینه‌سازی مورد مقایسه قـرار گرفتـه و در نهایـت مقـدار خطـای نسبی هر عامل محاسبه شده است. با ملاحظه‌ی مقـادیر خطا ملاحظه می‌شود که مقادیر حاصل از بهینه‌سازی با آن‌چه در واقعیت و طی آزمایش به‌دسـت آمـده اسـت اختلاف چندانی ندارد.

جدول ۸ مقایسه بین مقادیر تئوری و تجربی مربوط به حالت بهینه

| هدف / مقدار | HV | $T_{max}$ (°C) | $\acute{F}$ (N) | $R_t$ (μm) |
|---|---|---|---|---|
| مقدار آزمایشگاهی ($X_{exp}$) | 286.2 | 496 | 91.4 | 1.1 |
| مقدار به‌دست‌آمده از الگوریتم SA ($X_{opt}$) | 283.0 | 487 | 88.6 | 1.0 |
| مقدار حاصل از تاگوچی ($X_{tag}$) | 280.0 | - | - | - |
| درصد خطا $100 \times \left\|1 - X_{exp}/X_{opt}\right\|$ | 1.13 | 1.8 | 3 | 9.1 |




شکل ۵ نمودار تابع هدف کلی به همراه پارامترهای حالت بهینه

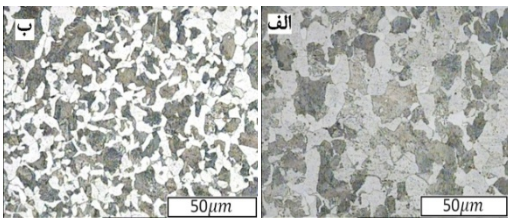
***تحلیل سـختی و متـالوگرافیکی.*** انتظـار مـی‌رود کـه ریزساختار نمونه‌ها حداقل در شرایطی که در آن مقدار حرارت بیش‌تری اعمال می‌شود، طی فرآیند تغییراتی را از خود نشان دهند. اما مشـاهده شـد کـه تحـت تمـام شرایط سـاختارها قبـل و بعـد از ماشـین‌کـاری تغییـر نمی‌کنند. تحقیقات نشان می‌دهند که تنش‌های پسـماند پس از سنگ‌زنی اساساً بـه یکـی از دلایـل زیـر ایجـاد می‌شوند [2,3]:

- تغییر فاز مارتنزیتی در نواحی نزدیک به سطح.
- سیلان پلاستیکی مواد روی سطح و نواحی مجاور آن، که خـود ناشـی از تـنش‌هـای حرارتـی حاصـل از گرمای تولیدشده حین فرآیند می‌باشد.
- تغییرشـکل پلاسـتیکی ناشـی از نیروهـای برشـی دانه‌های ساینده در سطح قطعه‌کار.

فولاد AISI1045 فولادی با سـختی‌پـذیری پـایین است. دیاگرام TTT این فولاد نشان می‌دهد که به‌علـت درصد کـربن کـم و حضـور دیگـر اجـزای شـیمیایی، منحنی سرد شدن برای استحاله‌ی مارتنزیتی می‌بایسـت تقریباً عمودی باشـد. بـا توجـه بـه ایـن‌کـه اولاً دمـای ایجادشده در فرآیند (حدود ٤٨٠ درجه‌ی سـانتی‌گـراد) به قدری نیست که سـیلان پلاسـتیکی و یـا اسـتحاله‌ی مارتنزیتی رخ دهد و ثانیاً سرعت خنک‌کاری به قـدری پایین است که شکل‌گیـری مارتنزیـت دور از دسـترس است، بنابراین، افزایش سختی و تنش پسـماند فشـاری می‌تواند تنها به دلیل تغییرشکل‌هـای پلاسـتیک شـدید ناشی از سنگ‌زنی باشد. در واقع تغییرشکل پلاسـتیکی

نزدیک سطح مربوط به پارامترهای سنگ‌زنی از جمله اندازه‌ی دانه‌ی ساینده، سرعت قطعه‌کار، عمق برش و خواص ماده است. شکل (٦) نتایج ریزساختار پرلیتی-فریتی یک نمونه سنگ‌خورده را نشان می‌دهد که مقادیر پارامترهای حاکم بر آن از روند بهینه‌سازی نتیجه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود اندازه‌ی دانه‌های ریزساختار کوچک‌تر شده است. ریز و هم‌محور شدن دانه‌ها مطابق شکل (٦- ب) دلیلی بر افزایش سختی سطح پس از فرآیند سنگ‌زنی است. مقادیر سختی در سطح این نمونه قبل و بعد از فرآیند در جدول (۹) آمده است که نشان از افزایش سختی در نمونه‌ها دارد. در مورد نمونه‌ی بهینه مقدار سختی سطح ثبت‌شده، حاصل از میانگین ۵ بار اندازه‌گیری سختی در سطح نمونه است.

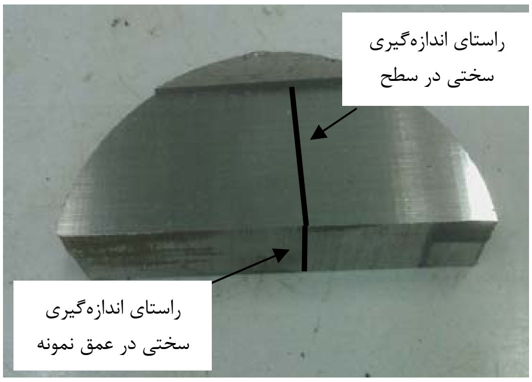
شکل (۷) مقطعی از یک نمونه سنگ خورده است که محل سختی اندازه‌گیری‌شده در مقطع و روی سطح نمونه را نشان می‌دهد. شکل (۸) نیز به‌صورت گرافیکی اثر پارامترهای فرآیند بر سختی در عمق نمونه را نشان می‌دهد (محل اندازه‌گیری سختی در عمق نمونه نیز در شکل (۷) نمایش داده شده است). پروفیل سختی قطعات برای شش نمونه با شش سطح متفاوت از جدول (٦) اندازه‌گیری شده است. این شش سطح شامل سطوح ۱، ٤، ۹، ۱۲، ۱٤ و ۱٦ از جدول (٦) به همراه شرایط بهینه از جدول (۷) (جمعاً ۷ نمونه) می‌باشد.




شکل ٦ نمایش ریزساختاری پرلیتی (نواحی سیاه) و فریتی (نواحی روشن) روی سطح یک نمونه‌ی AISI1045 (الف) پس از عملیات آنیلینگ (ب) پس از سنگ‌زنی تحت شرایط بهینه تاگوچی ( $v_w$=25m/min ,$v_c$=30m/s, s= 11mm/pass , $a_g$=1mm). هر یک از تصاویر با بزرگ‌نمایی 500X تهیه شده است.

جدول ۹ مقادیر سختی ویکرز قبل و بعد از فرآیند سنگ‌زنی با اعمال شرایط بهینه

| مقادیر سختی | قبل از فرآیند | بعد از فرآیند |
|---|---|---|
| سختی اول | 191.0 | 288.0 |
| سختی دوم | 184.0 | 293.0 |
| سختی سوم | 190.0 | 279.0 |
| سختی چهارم | 189.0 | 281.0 |
| سختی پنجم | 188.0 | 289.0 |
| میانگین | 188.4 | 286.0 |

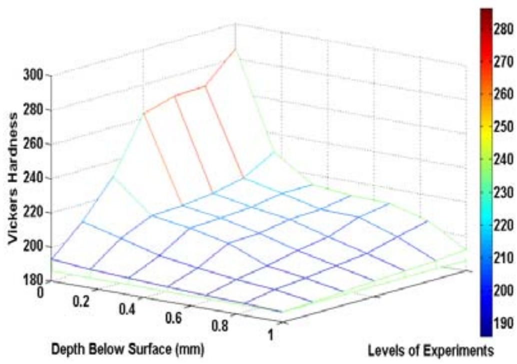



شکل ۷ راستای اندازه‌گیری سختی‌ها در سطح و مقطع نمونه، که برای جلوگیری از بروز خطا، تمام اندازه‌گیری‌ها در قسمت میانی نمونه انجام گرفته است

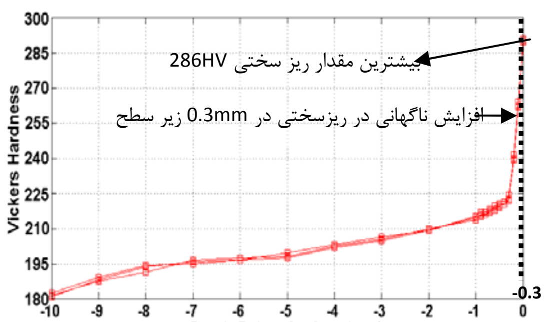
همان‌طور که ملاحظه می‌گردد مقادیر پارامترها روندی افزایشی دارند و در نتیجه، مقادیر سختی سطح نیز روندی صعودی یافته‌اند. شکل (۸) مبین این واقعیت است که با افزایش مقادیر پارامترها میزان سختی در نمونه‌ها بالا می‌رود. افزایش در سختی نمونه از افزایش در مقادیر عمق برش، نرخ تغذیه، سرعت قطعه‌کار و سرعت سنگ نتیجه می‌شود. مقادیر عمق برش و نرخ تغذیه بیش‌تر به افزایش سطح برشی و درنتیجه افزایش در نیروی برشی دلالت دارند، که به ترتیب به معنی افزایش در مقدار برداشت ماده و پس از آن افزایش در میزان تغییرشکل پلاستیک و سخت‌کاری

ماده است. از طرفی سختی سطحی قطعه با افزایش سرعت قطعه‌کار نیز افزایش می‌یابد که با تحقیقات قبلی سازگار است [2]. طبق مطالعات [16] این سخت‌شدگی سطحی در ماده از لحاظ متالورژیکی به دلیل ریز شدن دانه‌های ساختار و افزایش دانسیته نابه‌جایی‌ها، تغییرشکل پلاستیک و تنش‌های پسماند فشاری ایجادشده در ماده است.

در بحث مکانیزم شکل‌گیری براده، نه تنها مقدار تنش تعریف‌شده توسط ضخامت براده‌ی بریده‌نشده منجر به ایجاد تغییرشکل پلاستیک شدید می‌گردد، بلکه تنش فشاری هیدروستاتیکی زیر لبه‌ی برنده نیز ایجاد می‌گردد که این تنش خود منجر به ایجاد تغییرشکل پلاستیک می‌گردد. تنش‌های فوق و تغییرشکل پلاستیکی شدید، منجر به ایجاد تنش فشاری روی سطح قطعات می‌گردد [2,17].



شکل ۸ تغییرات سختی در عمق با افزایش مقادیر پارامترها



شکل ۹ مقادیر سختی ویکرز در عمق نمونه تحت شرایط بهینه

شکل (۹) مقادیر ریزسختی اندازه‌گیری شده را در مقطعی از قطعه‌کار که بر جهت سنگ‌زنی عمود است نشان می‌دهد. این نمونه همان نمونه‌ی متالوگرافی‌شده‌ی موجود در شکل (٦) است که با پارامترهای حاصل از روند بهینه‌سازی سنگ‌زنی شده است. سه خط رسم‌شده در شکل (۹) نشان می‌دهد که مقادیر سختی در هر ۱mm سه بار تکرار شده است. به عبارتی در هر عمق از مقطع قطعه‌کار، اندازه‌گیری سختی سه بار تکرار شده است. این در حالی است که در یک میلی‌متر نزدیک به سطح این اندازه‌گیری‌ها هر ۰/۱mm انجام گرفته است، چرا که سختی، همان‌طور که ذکر شد، در ناحیه‌ی نزدیک به سطح تغییرات قابل توجهی دارد. سختی در عمق ۰/۳ mm زیر سطح، به طور ناگهانی افزایش می‌یابد تا به ماکزیمم حد خود یعنی ۲۸٦HV می‌رسد. این مقدار سختی سطحی، معادل شرایط بهینه‌ای است که در شکل (۵) آورده شده است. محل اندازه‌گیری سختی در عمق نمونه نیز در شکل (۷) نشان داده شده است. مقدار استحکام کششی معادل با این سختی برابر ۹۲۰MPa است. این مقدار روند افزایشی در مقاومت کششی ماده را نشان می‌دهد. فرمولی که ارتباط دقیق بین سختی و استحکام کششی را نشان دهد در اختیار نیست و این تبدیل از جدول‌های معادل‌سازی سختی با مقاومت کششی موجود در [18] به دست آمده است.

واقعیت دیگر این است که تنش‌های پسماند کششی به دلیل بار حرارتی حین سنگ‌زنی ایجاد می‌شوند و تنش‌های پسماند فشاری ناشی از بار مکانیکی زیاد حین فرآیند است. بدین معنی که پارامترهای عملکردی که در ناحیه‌ی تماس دماهای بالا ایجاد می‌کنند سبب ایجاد تنش‌های پسماند کششی می‌شود. در حالی‌که پارامترهای فشاری که منجر به اعمال بار مکانیکی بیش‌تر بر سطح ماده می‌گردد سبب ایجاد تنش پسماند فشاری می‌شود [10]. یک پژوهش مشترک بین دانشگاه برمن آلمان و مؤسسه‌ی تکنولوژی

مواد نشان می‌دهد که قطعات سنگ‌زنی‌شده توسط سنگ‌زنی خزشی بر خلاف قطعات سنگ‌خورده با روش رفت و برگشتی مرسوم نسبت به افزایش عمق برش عکس العمل نشان می‌دهد و تنش‌های پسماند را به منطقه فشاری انتقال می‌دهد. بر این اساس زمانی که نرخ براده‌برداری ویژه $Q'_W$ (mm³/mm.s) افزایش می‌یابد، تنش‌های پسماند فشاری به واسطه‌ی افزایش عمق برش افزایش می‌یابد (نرخ براده‌برداری ویژه برابر مقدار حجم براده‌برداری‌شده از قطعه‌کار به ازای ۱ mm پهنای تماس سنگ در واحد زمان می‌باشد و عبارت است از حاصل‌ضرب عمق برش و سرعت قطعه‌کار) [10]. این موضوع را می‌توان با افزایش سرعت قطعه‌کار توجیه نمود که سبب می‌شود بار حرارتی فرصت نفوذ به درون قطعه‌کار را نداشته باشد. به بیان دیگر، تنش‌های پسماند کششی ایجادشده توسط بار حرارتی به کمک تنش‌های پسماند فشاری ایجاد شده توسط بار مکانیکی جبران می‌شود. علاوه بر این، سرعت بالای چرخ سنگ خود سبب دور کردن براده‌های داغ و به جای آن ایجاد بار مکانیکی می‌گردد که این فشار مکانیکی می‌تواند سبب سختی سطح و تنش پسماند فشاری در قطعه گردد. بنا بر آن‌چه گفته شد می‌توان نتیجه گرفت که این سخت‌شدگی سطحی در ماده از لحاظ مکانیکی به دلیل تغییرشکل‌های پلاستیک شدید ناشی از پارامترهای فرآیند است و از لحاظ متالورژیکی به علت ریز دانه شدن ساختار و تنش‌های پسماند فشاری ایجادشده در سطح ماده است.

## نتیجه‌گیری

با طراحی صحیح آزمایش‌ها به‌روش تاگوچی و بهینه‌سازی از صرف هزینه و زمان جلوگیری می‌گردد، که برای فولاد AISI1045 و شرایط سنگ‌زنی ارزیابی‌شده، نتایج زیر به‌دست می‌آید:

- زمانی‌که نرخ تغذیه، سرعت قطعه‌کار و عمق برش افزایش می‌یابد، سختی سطحی نیز بالا می‌رود و در عمق‌های برش بالاتر، سرعت قطعه‌کار روی سختی سطح تأثیر نمی‌گذارد.
- از مقایسه‌ی پارامترهای سنگ‌زنی مسطح نتیجه می‌شود که سرعت قطعه‌کار تأثیر کم‌تری روی سختی سطح نسبت به نرخ تغذیه و یا عمق برش (که دارای بیش‌ترین تأثیر است) دارد.
- افزایش سرعت سنگ فقط تا حدمعینی (۳۰m/s) منجر به افزایش سختی سطح می‌گردد.
- با اعمال پارامترهای بهینه‌ی حاصل از روش تاگوچی و بهینه‌سازی بیش‌ترین سختی سطحی قابل دست‌یابی است.
- پارامترهای حاصل از دو روش بهینه‌سازی اشاره‌شده، منجر به ایجاد تنش پسماند فشاری در نمونه گردید. دمای اندازه‌گیری‌شده پایین‌تر از آن است که سبب ایجاد تنش پسماند کششی در ماده گردد، از طرفی بار مکانیکی وارد بر سطح قطعات به واسطه‌ی بالابودن پارامترها منجر به ایجاد سختی در سطح نمونه‌ها می‌گردد و این در حالی است که مقدار زبری اندازه‌گیری‌شده در شرایط بهینه در محدوده‌ی مجاز و قابل‌قبولی باقی مانده است.
- روش SA به طور موفقیت‌آمیزی برای حل مسأله‌ی فوق با هدف افزایش سختی سطح، اجرا شد. این روند به‌گونه‌ای است که به‌راحتی می‌توان آن را برای سایر عملیات برش‌کاری چون تراش‌کاری، سنگ‌زنی محوری و ماشین‌کاری غیر سنتی اصلاح و به کار گرفت.

اگرچه هیچ تغییر ریزساختاری و استحاله فازی قابل توجهی در هیچ یک از شرایط مورد ارزیابی مشاهده نشد، اما تغییرات قابل‌توجهی در سختی سطحی مشاهده شد. سختی، که در طول مقطعی از قطعه‌کار اندازه‌گیری شد، تغییرات قابل‌توجهی از خود نشان می‌دهد. به علت حضور تنش پسماند فشاری در سطح، عمر خستگی قطعات بالا می‌رود. این نوع از

قطعات قابلیت کار در محیط‌های دینامیکی را دارنـد. از طرفی با اعمال شرایط بهینه، استحکام و سـختی سـطح بالا می‌رود که این امر صنعت را از انجام عملیاتی چون سختی‌سازی سطوح محصول بی‌نیـاز مـی‌سـازد و نیـز دست‌یابی به شرایط «سنگ‌زنی کـم‌تـنش» را آسـان‌تـر می‌سازد.

## تشکر و قدردانی

نویســندگان برخـود لازم مـی‌داننـد از مـدیر محتـرم آزمایشــگاه CAD/CAM و مــدیر گــروه متــالورژی دانشگاه فردوسی مشهد به ترتیـب آقایـان دکتـر بهنـام معتکف ایمـانی و دکتـر ابوالفضـل باباخـانی صـمیمانه تشکر و قدردانی نماینـد و همچنـین مراتـب قـدردانی خود را از آقـای مهنـدس جـلال مجتهـد مـدیر عامـل شرکت مهندسی پویا توربین تهران بابت ارائه امکانـات جهت انجـام برخـی از آزمـایش‌هـا و همچنـین واحـد تعمیرات مکانیک شرکت مجتمـع گـاز پـارس جنـوبی (SPGC) ابراز می‌دارند.

## مراجع


1. Rowe, W.B., "Thermal analysis of high efficiency deep grinding", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, pp. 4-8, (2001).
2. Zurita, O., Acosta, A. and Moreno, D., "Superficial hardening in the plane grinding of AISI 1045 steel", *Journal of Materials Engineering and Performance*, pp. 300-302, (2003).
3. Werner, T., Mayr, P. and Speicher, V., "Compressive residual stress in creep-feed ground work surface", *SME Technical Paper*, pp. 86-95, (1986).
4. Sines, G. and Carlson, R., " Hardness measurements for the determination of residual stresses", *A.S.T.M. Bull*, pp. 35-37, (1952).
5. Yu, X.X. and Lau, W.S., "A finite-element analysis of residual stress in stretch grinding", *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 13-22, (1999).
6. Doman, D.A. and Bauer, R., "Finite element modeling approaches in grinding", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, pp. 109–116, (2009).
7. Jin, T. and Stephenson, J., "Three dimensional finite element simulation of transient heat transfer in high efficiency deep grinding", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, (2004).
8. Singal, S., "*Fundamentals of machining and machine tools*": I. K. International Pvt Ltd, (2009).
9. Saravanan, P.R. and Sachidanandam, M., "A multi-objective genetic algorithm (GA) approach for optimization of surface grinding operations", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, pp. 1329-1333, (2002).
10. Tawakoli, T., "*High efficiency deep grinding*", John Wiley & Sons, (1993).
11. Ioan, M. H., Marinescu, D., Uhlmann, E., Brian Rowe, W. and Inasaki, I., "*Machining with*

*grinding wheels*", vol. 72. USA: CRC Press, (2007).

12. Andreas Albrecht, K.S., "*Stochastic algorithms: foundations and applications*", illustrated ed: Springer, (2003).
13. Salamon, P.S. and Frost, R., "*Facts, conjectures and improvements for simulated annealing Issue 7 of SIAM monographs on mathematical modeling and computation*", illustrated ed: SIAM, (2002).
14. Peter, J., Laarhoven, M., Emile, H.L. and Aarts, E., "*Simulated annealing: theory and applications Volume 37 of mathematics and its applications*", 3, reprint ed: Springer, (1987).
15. Wegst, C., "*Key to steel*", 18 ed: Stahlschlüssel Wegst, (1998).
16. Shaw, M., "Cutting and Grinding of Difficult Materials", *Technical paper presented at the Abrasive Engineering Society, Ceramic Industry Manufacturing Conference and Exposition, Pittsburgh*, PA, (1995).
17. Komanduri, R. and Ramamohan, R., "On the Mechanisms of Material Removal in Fine Grinding and Polishing of Advanced Ceramics and Glasses, in Advancement of Intelligence Production", *The Japan Society for Precision Engineering, Elsevier Science,* Amsterdam, (1994).
18. Tottle, C. R., "*An Encyclopedia of Metallurgy and Materials*", (1984).